

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.07.007

考虑响应违约风险的聚合商双重市场投标策略

张晶晶, 李淑杨

(合肥工业大学 新能源利用与节能安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要: 负荷聚合商(load aggregator, LA)集成需求侧资源参与双重市场(能量市场和备用市场)投标, 需要根据市场运营规则对具有不同行为特性的需求侧资源优化组合。文章考虑双重市场对响应资源的技术要求, 从负荷削减量和响应时间 2 个方面体现需求侧资源的不确定性, 引入条件风险价值(conditional value at risk, CVaR)理论, 考虑备用市场响应超时的违约风险, 制定其在双重市场的资源集成优化投标策略, 以响应电量不足期望评估聚合商参与双重市场的响应可靠性。算例分析不同风险偏好系数下聚合商利润与风险的动态关系, 优化需求侧资源的容量配置, 为聚合商双重市场的投标和风险度量提供参考。

关键词: 负荷聚合商(LA); 双重市场; 不确定性; 风险研究; 投标策略

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)07-0906-06

Dual market bidding strategy of aggregator considering response default risk

ZHANG Jingjing, LI Shuyang

(Anhui Province Key Laboratory of New Energy Utilization and Energy Saving, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Load aggregator(LA) integrates demand-side resources to participate in bidding in dual markets(energy market and reserve market), and needs to optimize the combination of demand-side resources with different behavior characteristics according to market operation rules. Considering the technical requirements for response resources in dual market, this paper reveals the uncertainty of demand-side resources from two aspects of load reduction and response time, introduces conditional value at risk(CVaR) theory, considers the default risk of response timeout in reserve market, formulates its bidding strategy of resource integration optimization in dual market, and evaluates LA's response reliability with the expectation of response power shortage. An example is given to analyze the dynamic relationship between profit and risk of aggregators under different risk preferences, and optimize the capacity allocation of demand-side resources, so as to provide reference for bidding and risk measurement of aggregators in dual market.

Key words: load aggregator(LA); dual market; uncertainty; risk research; bidding strategy

0 引 言

负荷聚合商(load aggregator, LA) 随着需求响应(demand response, DR)的发展, 克服了单体资源容量不足、响应特性差异大等困难, 增加了用户侧各种资源参与 DR 项目的机会。LA 作为终

端用户与电力公司之间的中间人, 整合分散的负荷资源接受市场调度; 可中断负荷(interruptible load, IL)成本低、投入时间短, 可作为一种优质的备用资源投入辅助服务市场^[1]; 辅助服务市场与主能量市场联合运营, 能够实现资源的最优化分配。目前 LA 的研究多针对其运营机制和调度策

收稿日期: 2021-07-14; 修回日期: 2021-08-17

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901100); 高等学校学科创新引智计划资助项目(BP0719039)

作者简介: 张晶晶(1977—), 女, 安徽寿县人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师。

略^[2],评估收益和风险,制定最优投标策略。

市场对响应资源的技术要求是 LA 投标的重要因素。相比能量市场,辅助服务市场的需求响应参与者要在约束时间内完成负荷削减,否则会导致停电事件,造成 LA 的经济损失。当前已有研究关注辅助服务市场需求响应的交易模式和奖惩措施,但参与备用市场的 DR 资源的技术要求和投标量分配策略研究较少。文献[3]预估 LA 在双重市场响应量不足造成的违约情况,但忽略了辅助服务市场的特殊性,未区分备用服务的类型和技术要求;文献[4]针对 IL 协同发电机参与系统备用优化问题,采用均匀分布描述负荷响应量,未讨论 IL 能否满足备用服务的技术要求;文献[5]考虑备用市场对负荷响应时间的要求,但未考虑 IL 响应量和响应时间的不确定性,而这两者都会造成 LA 的利润损失。

目前针对不确定性引起 LA 参与双重市场的响应可靠性和风险问题的研究缺乏相关评估指标和分析方法。IL 参与响应时存在违约的概率,文献[6]根据 DR 资源提供备用的容量误差,分析 IL 不响应对系统可靠性的影响,但未考虑 DR 行为的不确定性给 LA 造成的风险;文献[7]评估需求响应对多能源综合系统的供电可靠性影响,但目前风险度量指标多针对配电网,较少从 LA 层面分析响应可靠性;文献[8-9]考虑负荷响应量不确定性,提出针对 LA 单独参与电能市场的响应可靠性及风险量化指标,未考虑双重市场投标场景。

本文考虑电力市场对 DR 项目的技术要求,计及 IL 响应量不确定性和备用市场响应时间不确定性,建立了 LA 双重市场的投标决策模型,讨论不同风险偏好系数下 LA 利润与条件风险价值(conditional value at risk, CVaR)的均衡关系,决策 LA 的 3 类资源在双重市场的投标容量,用响应电量不足期望评估 LA 的响应可靠性,对 LA 制定双重市场投标策略具有指导意义。

1 LA 参与双重市场的运营机制

LA 从用户侧购买 DR 资源,在电能市场提交意向削减的容量,与运营商签订合同,合同中规定响应容量、交易价格等^[10],实时运行时按约定投标量削减,运营商按实时电价给 LA 响应补偿。

为保证电力系统的安全运行,提高供电质量,除正常的发电、用电外,电网还需额外配置备用服务。参考美国得州电力可靠性委员会(Electric

Reliability Council of Texas, ERCOT) 辅助服务市场运营模式,ERCOT 在日前市场采购辅助服务资源,与 LA 签订双边合同,以确保备用容量实时可用^[11]。市场运营商先以容量价格^[6]购买 LA 在备用市场的投标量,实际运行时以一定概率对 DR 资源进行调用,并对实际调用资源给予电量价格补偿。LA 在需求侧购买响应资源,从中间差价赚取利润。

考虑备用服务的特殊性,投入备用市场的 DR 资源需满足一定的响应时间限制。响应时间是指负荷从接收到调度指令,直至达到指令要求完成削减所需的最长时间。参考文献[5]中对于不同种类备用服务的技术要求,将备用市场划分为 5 min 旋转备用、10 min 旋转备用和补充备用 3 个区间。不同类型的负荷受生产条件和生活习惯等因素限制,停电准备所需时间长短不一。若 DR 资源实际响应时间超出相应备用服务市场的要求,则市场对 LA 施加惩罚。电能市场执行 DR 项目可提前较长时间通知负荷准备削减电量^[12],不存在响应超时问题。

2 投资组合理论与 CVaR 风险度量

2.1 投资组合理论

投资组合理论指导投资者规划各类资产以符合其对利润和风险的需求。根据投资组合理论,风险和利润同时作为选择合理投资目标的重要参数,投资者以利益最大和风险最小为目标,将优化投资组合以利润和风险为纵横坐标所绘制的曲线即为投资组合有效前沿。

2.2 基于 VaR 和 CVaR 的风险度量

CVaR 和 VaR 是投资者常用的风险度量手段,VaR 表示投资组合在置信度 β 下的最大经济损失, CVaR 表示损失超过 VaR 部分的期望值。设 X 为投资组合集合, $X \subset \mathbf{R}^n$; 函数 $f(x, y)$ 表示投资方案造成的损失,取期望利润的损失值。其中: $x \in X$ 为 n 维投资组合方案; 随机变量 $y \in \mathbf{R}^m$, 其概率密度函数表示为 $\rho(y)$; 在损失不超过临界损失值的范围内, $\rho(y)$ 满足如下分布规律:

$$\Psi(x, \alpha) = \int_{f(x, y) < \alpha} \rho(y) dy \quad (1)$$

给定置信度,该置信度下投资方案损失对应的 VaR 为:

$$\text{VaR}(x) = \min\{\alpha \in \mathbf{R}; \Psi(x, \alpha) \geq \beta\} \quad (2)$$

损失函数 $f(x, y)$ 超出 VaR 部分的期望值计算公式为:

$$\text{CVaR}(x) = E[f(x, y) \geq \text{VaR}(x)] = \frac{1}{1-\beta} \int_{f(x, y) \geq \text{VaR}(x)} f(x, y) \rho(y) dy \quad (3)$$

式(3)中无法用解析式直接表示 $\text{VaR}(x)$ 项, 因此引入如下变换函数:

$$F_\beta(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{1-\beta} \int [f(x, y) - \alpha]^+ \rho(y) dy \quad (4)$$

其中, $[f(x, y) - \alpha]^+$ 为 $\max\{f(x, y) - \alpha, 0\}$ 。

3 LA 双重市场的投标决策模型

3.1 IL 响应特性

LA 掌握的 IL 资源分为工业、商业、居民 3 类, 其响应特性差异主要体现在响应量波动(实际负荷削减量相对于投标量的波动)和响应时长(市场发出响应指令到完成负荷削减的时长) 2 个方面。

3.1.1 IL 响应可靠性特点

本文用实际响应量波动的大小衡量 IL 参与需求响应的可靠性, 其响应量通常用正态分布描述, 其中标准差体现响应量的波动。工业、商业、居民 3 类 IL 的不确定性依次增加。3 类 IL 中, 工业用户易于操控、不确定性小, 但由于工厂负荷的特殊性和生产工序限制, 负荷中断造成的损失大, 因此应给予高价补偿。商业用户相比工业用户具有更多不确定因素, 价格较低。另有一部分居民负荷容量分散、聚合难度大, 不确定性大, 因此给予较低的补偿价格。

3.1.2 IL 响应时长

与商业用户和居民用户相比, 工业用户的需求响应实施更为困难。工业生产过程要考虑材料存储、产品性质和生产班制等因素, 因此完成负荷削减任务需要较长的准备时间, 响应时间长。而商业用户和居民用户停电的制约条件相对宽松, 可以在短时间内完成响应。负荷实际响应速度存在一定的不确定性, 用正态分布模型描述 IL 响应时间。

3.2 计及 CVaR 的需求侧资源投标决策模型

LA 在日前阶段向双重市场投标, 将一日内的 24 h 作为 1 个计算场景。IL 响应量的波动引起 LA 利润的波动。同时, 若投入备用市场的资源响应时间超过规定, 市场运营商应向 LA 施加惩罚。LA 目标是获取最大利润的同时实现风险最小化。 R_{CVaR} 为 CVaR 风险度量项^[13], 衡量 IL 响应量的波动和备用市场响应超时引起的损失, 以风险偏好系数 δ 加入目标函数, δ 衡量 LA 对经

济损失风险的接受程度。通过蒙特卡洛模拟 IL 响应不确定性的分布, 可以近似估计 CVaR 值^[14]。LA 日内响应目标函数为:

$$\max F = B^{\text{ele}} + B^{\text{res}} - \delta R_{\text{CVaR}} \quad (5)$$

$$B^{\text{res}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\text{ele}} s_{i,t} (\rho_t - c_i^{\text{ll}}) \quad (6)$$

$$B^{\text{res}} = p_c \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\text{res}} s_{i,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\text{res}} s_{i,t} (p_c p_{\text{prob},t} - c_i^{\text{ll}}) \quad (7)$$

其中: B^{ele} 、 B^{res} 分别为 LA 在电能市场和备用市场投标所得利润; $P_{i,t}^{\text{ele}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{res}}$ 分别为 t 时段第 i 类负荷投入电能和备用市场的容量; T 为总响应时段; N 为负荷类型; 状态指标 $s_{i,t} = 1(0)$ 表示第 i 类负荷在 t 时段(未)参与响应; ρ_t 为 t 时段电价; c_i^{ll} 为 LA 给予第 i 类负荷响应容量的补偿价格; p_c 为备用市场在 LA 处购买响应量预付的容量价格; p_c 为实际调用备用容量的电量价格; t 时段投标容量以一定的概率 $p_{\text{prob},t}$ 被调用, 日利润 $B_h = B^{\text{ele}} + B^{\text{res}}$ 。

在求取式(4)中的积分项时, 往往无法得到 $\rho(y)$ 的解析式, 通过蒙特卡洛模拟 IL 响应不确定性的分布, 可以近似估计函数 $F_\beta(x, \alpha)$ 的值。设 $y_1, y_2, \dots, y_q \in y$ 为随机抽样的 q 个样本, 则函数 $F_\beta(x, \alpha)$ 的估计式为:

$$\tilde{F}_\beta(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{q(1-\beta)} \sum_{k=1}^q [f(x, y_k) - \alpha]^+ \quad (8)$$

则有 $\text{CVaR}(x) = \min \tilde{F}_\beta(x, \alpha)$ 。

从而得到 CVaR 风险度量项其表达式为:

$$R_{\text{CVaR}} = \alpha + \frac{1}{q(1-\beta)} \sum_{h=1}^q \tau_h \quad (9)$$

其中, α 为置信水平 β 下的风险价值 VaR。令 $\tau_h = [f(x, y) - \alpha]^+ (h=1, 2, \dots, q)$ ^[13], 表示超过 VaR 的损失, 实际计算中采用以下 2 个不等式限制 τ_h , 即

$$\tau_h \geq 0, \forall h \quad (10)$$

$$\tau_h \geq E(B_h) - B_h - \alpha, \forall h \quad (11)$$

LA 在双重市场投标的约束为:

$$\begin{aligned} \text{s. t.} \quad & 0 \leq P_{i,t}^{\text{ele}} s_{i,t} + P_{i,t}^{\text{res}} s_{i,t} \leq P_{\text{max}}, \\ & \sum_{t'=t}^{t+T_{\text{max}}-1} z_{i,t'}^{\text{off}} \geq z_{i,t}^{\text{on}}, \\ & \sum_{t \in T} z_{i,t}^{\text{on}} \leq M_N, \\ & z_{i,t}^{\text{on}} - z_{i,t}^{\text{off}} = s_{i,t} - s_{i,t-1}, \\ & z_{i,t}^{\text{on}} + z_{i,t}^{\text{off}} \leq 1 \end{aligned} \quad (12)$$

其中: P_{\max} 为 IL 的容量上限; $z_{i,t}^{\text{on}} = 1(z_{i,t}^{\text{off}} = 1)$ 表示合同在 t 时段开始(结束); T_{\max} 为合同规定的负荷最长持续响应时间; M_N 为合同规定的每日最大执行次数。

3.3 LA 的响应可靠性评估

本文用响应电量不足期望(expected response capacity not supplied, ERCNS) 作为 LA 的响应可靠性指标,衡量市场计划调用量和 LA 双重市场的实际响应量的差额, t 时段 LA 不参与第 m 类市场投标或无响应量不足时为 0,反之为:

$$E_{\text{ERCNS},m,t} = E(P_{\text{LA},m,t} - \sum_{i=1}^N \tilde{P}_{i,m,t}^{\text{res}}) \quad (13)$$

其中: $P_{\text{LA},m,t}$ 、 $\tilde{P}_{i,m,t}^{\text{res}}$ 分别为 t 时段 LA 第 m 类的市场计划调用量和实际响应量^[9]。

本文决策模型是典型的混合整数线性规划问题,通过调用 CPLEX 求解器,利用 YALMIP 工具箱求解。

4 算例分析

4.1 算例条件

选取国外某电力市场某日实时电价作为历史电价数据^[15],如图 1 所示。LA 掌握的需求侧 IL 资源的基本参数见表 1 所列^[3]。分别有工业负荷 IL₁、商业负荷 IL₂ 和居民负荷 IL₃。以 IL 投标量的 σ_1 倍作为标准差,用正态分布描述负荷响应量。 μ_2 、 σ_2 为负荷响应时间的均值和标准差。规定负荷的 $\mu_2 - \sigma_2$ 能够满足备用服务响应时长要求为 IL 投入备用市场的条件。备用市场的 3 类备用服务的技术要求参见文献^[5]。IL 各时段在备用市场的实际调用概率不同,8:00—10:00、16:00—19:00 为高峰时段,23:00—24:00、次日 0:00—5:00 为谷时段,其余为平时段,对应的调用概率分别为 0.9、0.4、0.6。容量价格 100 元/MW,3 类备用服务电量价格^[4] 依次为 540、430、395 元/(MW·h),响应时间超时的惩罚价格^[15] 为 280 元/(MW·h)。 T_{\max} 取 6 h, M_N 取 2。

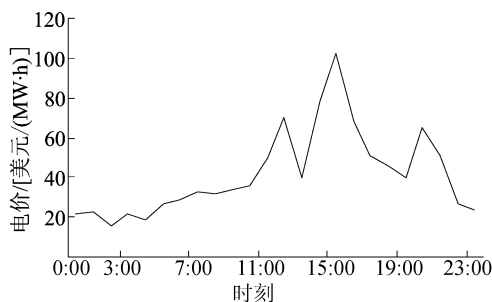


图 1 国外某电力市场实时电价

表 1 合同参数

负荷类型	总量/MW	补偿价格/ (元/MW)	σ_1	μ_2/min	σ_2
IL ₁	10	335	0.02	30	2
IL ₂	10	268	0.06	8	2
IL ₃	10	200	0.10	4	2

本文 LA 所掌握的资源总量远小于电能市场和各备用市场的需求总量,因此不考虑市场需求量对 LA 投标量的限制及负荷中断对市场价格的影响。

4.2 LA 投标策略对利润的影响

LA 只参与电能市场投标时,CVaR 仅需考虑 IL 响应量的不确定性风险;参与双重市场投标则需同时考虑响应量波动的风险和响应时间超时造成的惩罚。设定 $\delta=0.5$,LA 参与双重市场投标,DR 资源调度结果见表 2 所列。

表 2 LA 的资源调度结果

调度结果		双重市场投标	仅电能市场投标
$F/\text{元}$		65 349.6	42 112.2
$B_h/\text{元}$		77 392.4	43 279.3
$R_{\text{CVaR}}/\text{元}$		24 085.7	2 334.3
IL ₁ 投标量/MW	补充备用	50	0
	电能市场	50	80
IL ₂ 投标量/MW	10 min 备用	50	0
	补充备用	30	0
IL ₁ 投标量/MW	电能市场	40	100
	5 min 备用	80	0
IL ₁ 投标量/MW	10 min 备用	10	0
	补充备用	0	0
电能市场		30	100

与相同条件下仅参与电能市场相比,双重市场投标时 LA 更倾向于投入 3 类备用市场,IL 投标量分别增加 20 MW,利润增加近 1 倍,但 LA 风险增大,需考虑响应超时的惩罚。

市场多样性有利于提高 LA 的资源配置效率,IL 可根据其自身响应特性及风险偏好系数选择合适的市场参与响应,实现效益最大化和风险最小化。

4.3 不同 δ 下 LA 利润及风险变化趋势

在 LA 仅参与电能市场投标的场景下, δ 变化时工商业和居民用户投标量、风险值的变化如图 2 所示。从图 2 可以看出,LA 考虑负荷响应量波动带来的风险, δ 从 0.5 增至 25.0,LA 对风险的厌恶程度提高,为降低 CVaR,其投标策略趋于谨慎,而居民和商业用户的高不确定性使 LA 承受较

大风险,因此 LA 调整其总投入量均减少 50 MW, CVaR 降低 2 050.4 元, LA 日利润由 43 279.3 元降至 11 715 元。

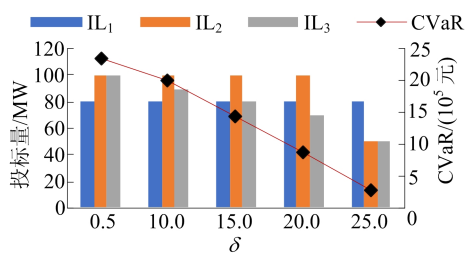


图 2 不同 δ 下参与电能市场各类用户投标量及风险值

在 LA 同时参与双重市场投标的场景下,调节 δ 取值,响应电量不足期望(ERCNS)见表 3 所列。

δ	ERCNS/(MW · h)
0.3	62.6
0.5	54.8
0.7	19.6
0.9	6.0
10.0	0.7

由表 3 可知, δ 增大时, LA 缩减响应电量不足期望,以减小风险,市场按 LA 申报容量实际调用资源时的电量缺额减少, LA 日利润与 CVaR 的有效前沿曲线如图 3 所示。

相比 VaR, CVaR 用以衡量损失超过 VaR 临界值时的平均潜在损失, CVaR 能充分衡量尾部损失,因此更稳健地应用于 LA 的投资风险评估。由图 2 可知, δ 的增加伴随着 CVaR 的减小, δ 从 0.3 增至 0.9, CVaR 从 27 261.7 降至 4 824.2 元;而 δ 为 10.0, CVaR 为 2 648.7 元,可知 δ 在 [0.3, 0.9], LA 对 δ 的变化较敏感, δ 在 [0.9, 10.0], CVaR 变化幅度较小,因此对于风险偏好系数大于 10.0 的情况不再讨论。

LA 损失随 δ 增大而递减, δ 较大时, 损失费用大幅下降,可见保守的投标策略有规避风险的效果。 δ 为 0.5 且仅投入电能市场时,无响应超时的惩罚 CVaR 为 2 334.3 元,比双重市场投标的场景减少 21 751.4 元。同时 LA 在双重市场投标日利润随 δ 增大而减小,结合表 3 的 ERCNS 可知,为降低风险, LA 采取了更加谨慎的投标策略,追求更稳固的利润。LA 的 CVaR 和日利润的有效前沿曲线单调递增,表明“高风险高利润,低风险

低利润”的市场投资规律。

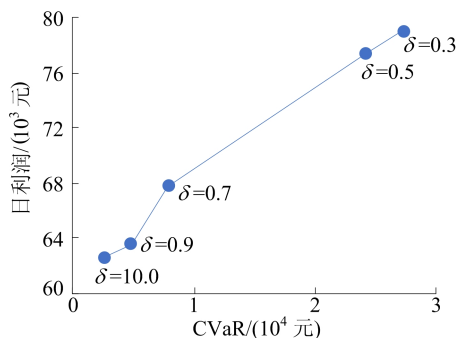


图 3 LA 的 CVaR 和日利润的有效前沿曲线

4.4 不同风险偏好系数下 LA 各市场投标量

LA 在双重市场的各类资源投标情况如图 4 所示。

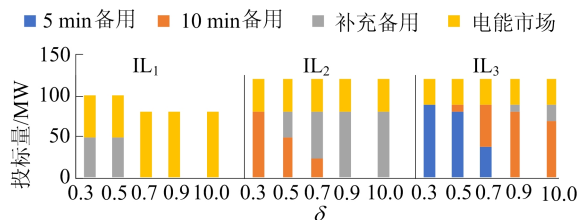


图 4 不同 δ 时 3 种资源投标量

从图 4 可以看出:随着 δ 增加,工业 IL₁ 备用市场投标量减至 0,将容量转移至电能市场;商业 IL₂ 在 10 min 备用市场的投标量递减,把负荷转移至补充备用市场;居民 IL₃ 在 5 min 备用市场投标减少,而 10 min 备用市场和补充备用市场投标量上升。

随着 LA 对风险厌恶程度的上升,IL 选择参与技术要求低,但补偿金额较少的 DR 项目,投标策略偏向于保守以规避风险。电能市场按实时电价给予 LA 补偿,当电价低于负荷价格时,LA 不参与电能市场交易,因此投标容量受到市场价格制约,投入电能市场的容量不会超出某一限值。

从 3 类资源的投入总量看, δ 增加,参与双重市场投标时 IL₁ 投标量减少 20 MW,考虑到 IL₁ 响应时间长,仅有补充备用市场和电能市场可供投入,LA 将负荷转移至风险小的电能市场,获取能量市场利润并规避风险。受市场价格限制,IL₁ 至多有 8 个时段能在电能市场获利,其日投标量达到 80 MW 上限后不再增加。IL₂、IL₃ 在 1 d 内有 12 h 参与响应,已达到合同规定的最大时段数,投标总量不再增加。其响应时间较短,可供选

择的备用服务种类多,随 δ 增加,投入不同备用市场的容量分配发生改变,以 Π_3 为例, δ 为0.3时在备用市场只投入5 min备用市场, δ 增大时LA将更多容量转移至其他两类备用市场以减小风险。

与图2仅参与电能市场相比,图4中3类负荷投入总量的变化趋势发生改变。向电能市场投标的场景中仅考虑负荷响应量波动带来的风险, Π_1 投入量不变, Π_2 、 Π_3 投标量减少;而参与双重市场投标时 Π_1 投标量减少,此时备用市场负荷响应超时的惩罚对风险值影响更大,LA更多考虑负荷响应时长因素。对比图2、图3的CVaR变化趋势,双重市场投标的风险值更高,在相同的 δ 范围内,LA对于风险偏好系数的变化更加敏感, δ 应在相对较小的范围内调整取值,LA也将随 δ 改变更加积极地调整投标策略。

5 结 论

1) LA参与双重市场联合投标的利润高于仅向单一电能市场投标的利润,由于 Π 响应量和响应时间的不确定性,也增加了LA的风险。LA可灵活分配各类市场投标量,提高资源配置效率,实现利益和风险的均衡。

2) LA投标策略考虑了不同类型的需求响应DR资源的技术要求,顺应需求响应项目市场标准体系日益完善的发展趋势。以响应电量不足期望表示LA的双重市场响应可靠程度,证明了风险偏好系数对LA的投标策略有显著影响。CVaR为LA参与双重市场的需求侧资源规划提供了有效的风险评估手段。

[参 考 文 献]

[1] 赵福林,俞啸玲,杜诗嘉,等. 计及需求响应的含大规模风电并网下电力系统灵活性评估[J]. 电力系统保护与控制,

2021,49(1):42-51.

- [2] 潘军,吴红斌. 计及旋转备用的电动汽车与风电/火电协调优化调度[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(3):409-414.
- [3] 张晶晶,蒋峰,吴红斌,等. 计及CVaR的负荷聚合商双重市场投标策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(12):153-158.
- [4] 王蓓蓓,李义荣,李扬,等. 考虑响应不确定性的可中断负荷参与系统备用配置的协调优化[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):82-89.
- [5] 张粒子,杨萌,梁伟,等. 辅助服务市场中集成商的资源集成投标策略[J]. 电网技术,2019,43(8):2808-2815.
- [6] 耿妍. 计及多元需求响应资源参与的备用市场研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.
- [7] 路红池,谢开贵,王学斌,等. 计及多能存储和综合需求响应的多能源系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):72-78.
- [8] 孙伟卿,向威,裴亮,等. 电力辅助服务市场下的用户侧广义储能控制策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(2):68-79.
- [9] 张晶晶,张鹏,吴红斌,等. 负荷聚合商参与需求响应的可靠性及风险分析[J]. 太阳能学报,2019,40(12):3526-3533.
- [10] MA O, ALKADI N, CAPPERS P, et al. Demand response for ancillary services [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4):1988-1995.
- [11] MING H, KIA B, LEE Y, et al. Prediction and assessment of demand response potential with coupon incentives in highly renewable power systems [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 3(5):959-966.
- [12] 甘德强,杨莉,冯冬涵. 电力经济与电力市场[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [13] 谢俊,陈星莺. 构造供电公司最优电能分配策略的CVaR方法[J]. 现代电力,2007,24(2):39-43.
- [14] 陈寒,唐忠,鲁家阳,等. 基于CVaR量化不确定性的微电网优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(5):105-115.
- [15] MASOOD P, MAHMUD F, MOHAMMAD S. Optimal demand response aggregation in wholesale electricity markets [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4):1957-1965.

(责任编辑 张 镛)